

Article, Published Version

Zweck, Heinz

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen (III)

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103209>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Zweck, Heinz (1954): Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen (III). In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 4. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 38-47.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen.

Von Oberregierungsbaurat Dr.-Ing. Heinz Zweck
(Schluss aus Heft 3)

E. Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen.

Die zur Zeit bekannten erdstatischen Formeln zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen können in zwei Gruppen eingeteilt werden, und zwar in die, bei der die Verfasser von einem zweidimensionalen Problem ausgegangen sind, und in die, bei der das Problem den tatsächlichen Verhältnissen entsprechend als dreidimensionales betrachtet wurde. Bei der ersten sind entweder, wie z.B. bei Bénabenq (Lit. 1), Dörr (Lit. 3) und Krey (Lit. 9), ebene Gleitflächen oder, wie z.B. bei Caquot-Kérisel (Lit. 2), gekrümmte Gleitflächen angenommen. Die Berechnung der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung des dreidimensionalen Problems wurde von Skempton (Lit. 16) und Meyerhof (Lit. 12) semi-empirisch gelöst. Auch Hansen (Lit. 8) hat - jedenfalls für den Spitzenwiderstand - das räumliche Problem insofern berücksichtigt, als er die Formel von Caquot durch einen empirischen Faktor erweitert hat. Unter Heranziehung der Ergebnisse von Ankerplattenversuchen hat Streck (Lit. 18) für einen quadratischen Pfahl in mitteldichtem Sand Berechnungsformeln, die die räumliche Wirkung des Erdwiderstandes berücksichtigen, aufgestellt.

Die genannten Verfahren gehen von einer Gleitflächenbildung aus. Ohde (Lit. 14) hat der Ableitung seiner Formeln die Verformbarkeit des Bodens zugrundegelegt. Von einer Betrachtung dieses Verfahrens, das von ganz anderen Voraussetzungen ausgeht, wird in der vorliegenden Arbeit abgesehen.

Die Bemessung des Spitzenwiderstandes und der Mantelreibung wird bei allen Verfahren getrennt durchgeführt und die gesamte Tragfähigkeit als Summe beider Einflüsse berechnet. Man muss aber dabei berücksichtigen, dass in Wirklichkeit eine beiderseitige Wechselwirkung besteht. Durch die Mantelreibung werden Kräfte auf den Boden abgegeben, die den Spitzenwiderstand erhöhen, andererseits wird die Mantelreibung herabgesetzt, wenn die Setzungen

des Bodens unter der Spitze nicht die entsprechende Bewegung zur Erzeugung der Mantelreibung zulassen.

Die Tragfähigkeitsformeln für kohäsionslose Böden lassen sich auf die folgende allgemeine Form zurückführen:

$$P = \gamma_{sp} \cdot p_{sp} \cdot F + \gamma_M \cdot p_M \cdot U \cdot h' \cdot \mu' \quad (1)$$

Die Zeichenerklärung ist in Abbildung 15 gegeben. Für einen Pfahl, der auf der ganzen Länge im Sand oder Kies steht, vereinfacht sich die Formel zu

$$P = \gamma_{sp} \cdot \gamma \cdot h \cdot F + \gamma_M \cdot \frac{\gamma \cdot h^2}{2} \cdot U \cdot \mu' \quad (2)$$

Die Formel von Streck lässt sich nicht auf diese Form zurückführen, da hier die Mantelreibung proportional der ersten Potenz der Pfahllänge zunimmt.

In der Abbildung 15 sind die γ_{sp} -, γ_M - und μ' -Werte eingetragen, die sich aus verschiedenen Formeln ergeben. Die γ_{sp} -Werte sind ausserdem in Abbildung 16 und die $\gamma_{sp} \cdot \mu'$ -Werte für $\phi = \phi$ und entsprechend den später beschriebenen Reibungsversuchen für $\phi = \frac{\phi}{2}$ in Abbildung 17 gezeichnet.

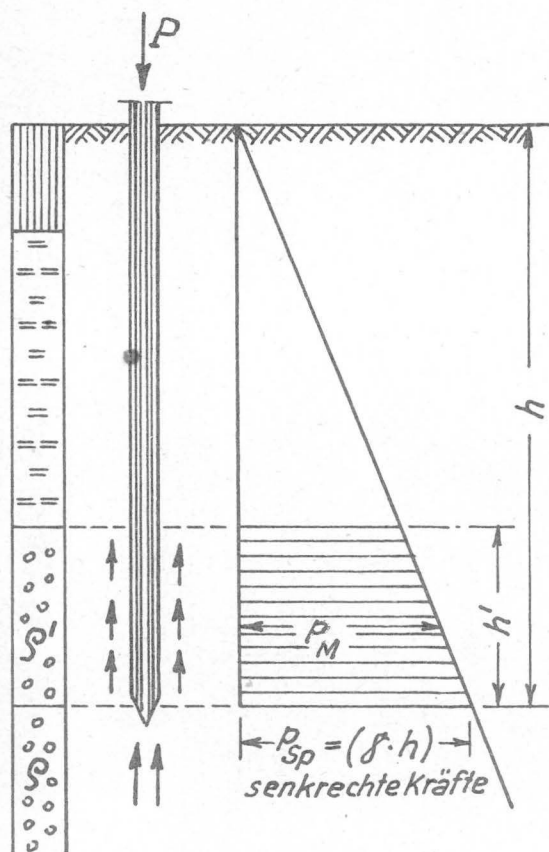
F. Vergleich der Versuchsergebnisse mit der Theorie.

I. Reibungswerte des Versuchsbodens.

In dem Abschnitt B II sind an bodenphysikalischen Kennziffern des Versuchsbodens die Kornverteilung und die Lagerungsdichte angegeben. Die Schubfestigkeit wurde durch einen dreiaxialen Druckversuch und einen direkten Scherversuch bestimmt. Für den festgelagerten Sand ergab sich im dreiaxialen Versuch ein Winkel von $\phi = 41^\circ$ und im direkten Scherversuch ein Winkel von $\phi = 40^\circ$. Für die lockere Lagerung wurde der Winkel im direkten Scherversuch zu $\phi = 36^\circ$ ermittelt. Als Reibungswinkel zwischen Stahl und Sand wurde ein Wert von $\phi = 20^\circ$ gefunden.

II. Berechnung der γ_{sp} - und $\gamma_M \cdot \mu'$ -Werte aus den Versuchen.

In der Abbildung 7 sind die im Abschnitt D I definierten "Grenztragfähigkeiten" für verschiedene Pfahllängen und Rauigkeiten des Mantels aufgetragen. In der folgenden Tabelle sind diese Werte



U = Pfahlumfang
 F = Pfahlfläche
 φ = Reibungswinkel des Bodens unter der Pfahlspitze
 φ' = Reibungswinkel des Bodens über der Pfahlspitze
 σ = Wandreibungswinkel

$$P = \psi_{Sp} \cdot p_{Sp} \cdot F + \psi_M \cdot p_M \cdot U \cdot h' \cdot \mu'$$

Nr.	Verfasser	ψ_{Sp}	ψ_M	μ'
1	Bénabenq	$\text{tg}^4(45 + \varphi/2)$	$\text{tg}^2(45 + \varphi'/2)$	$\text{tg} \varphi'$
2	Dörr	$\text{tg}^2(45 + \varphi/2)$	fest	$\frac{1}{\cos^2 \varphi'}$
			locker	$\frac{1}{2} \sin 2\varphi'$
3	Krey	$\text{tg}^2(45 + \varphi/2)$ eventuell $\text{tg}^4(45 + \varphi/2)$	eventuell $\frac{1}{\text{tg}^2(45 + \varphi'/2)}$	$\text{tg} \sigma$
4	Caquot Kérisel	$(1 + 0,32 \text{tg}^2 \varphi) \cdot \text{tg}^2(45 + \varphi/2) \cdot e^{\pi \cdot \text{tg} \varphi}$	$e^{\frac{19}{30}} \cdot \text{tg} \varphi' \cdot [4 + \text{tg} \varphi'^{2/3}]$	$\text{tg} \varphi'$
5	Hansen	$3 \cdot e^{\pi \text{tg} \varphi} \text{tg}^2(45 + \varphi/2)$	$\cos^2 \varphi'$	$\text{tg} \varphi'$
6	Skempton	Werte sind in Funktion von φ graphisch angegeben	wird für sandige Böden vernachlässigt	—
7	Meyerhof	Semi-empirische Werte in Funktion von φ	wird für sandige Böden vernachlässigt	—

Abb. 15

Zweck
Pfahlversuche

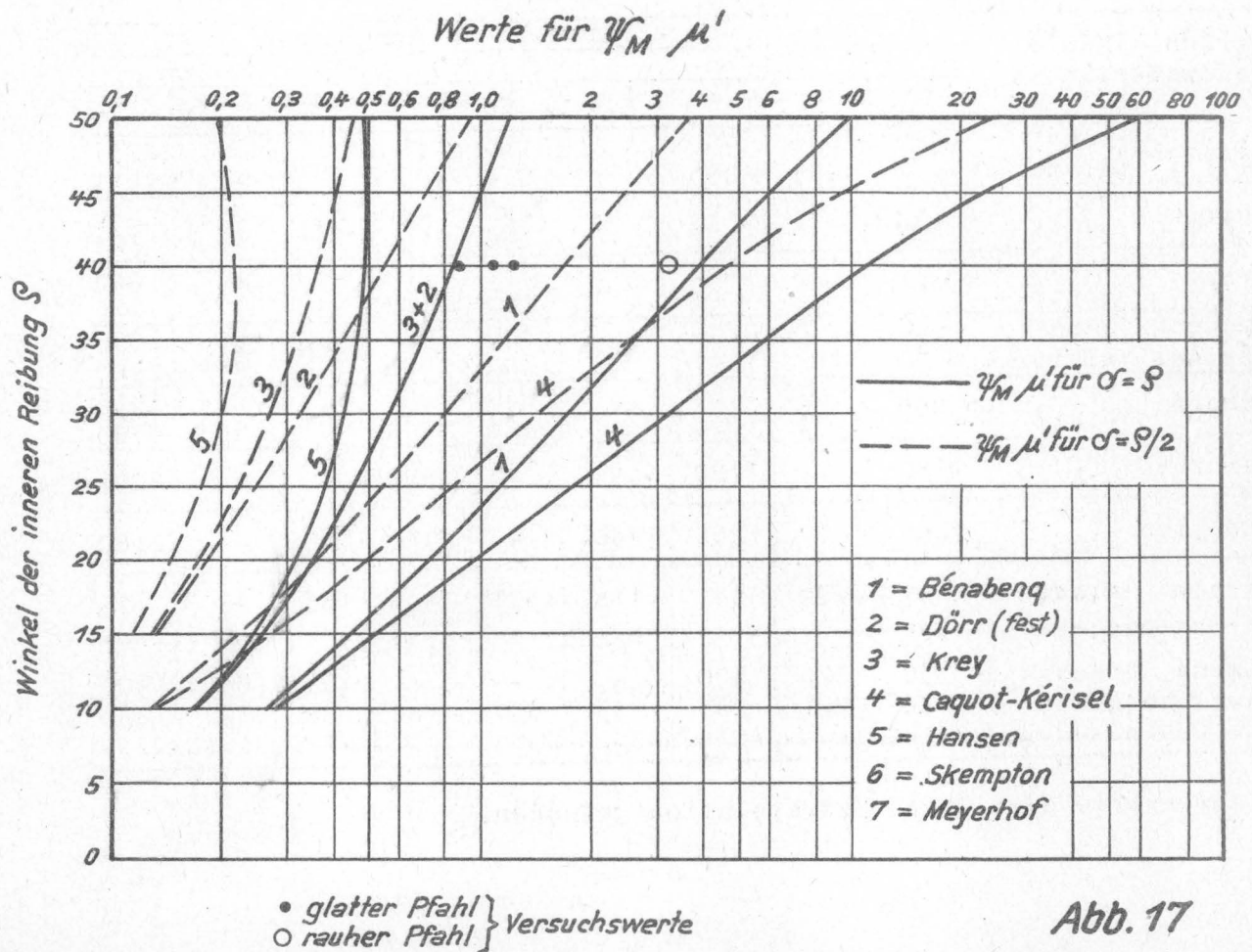
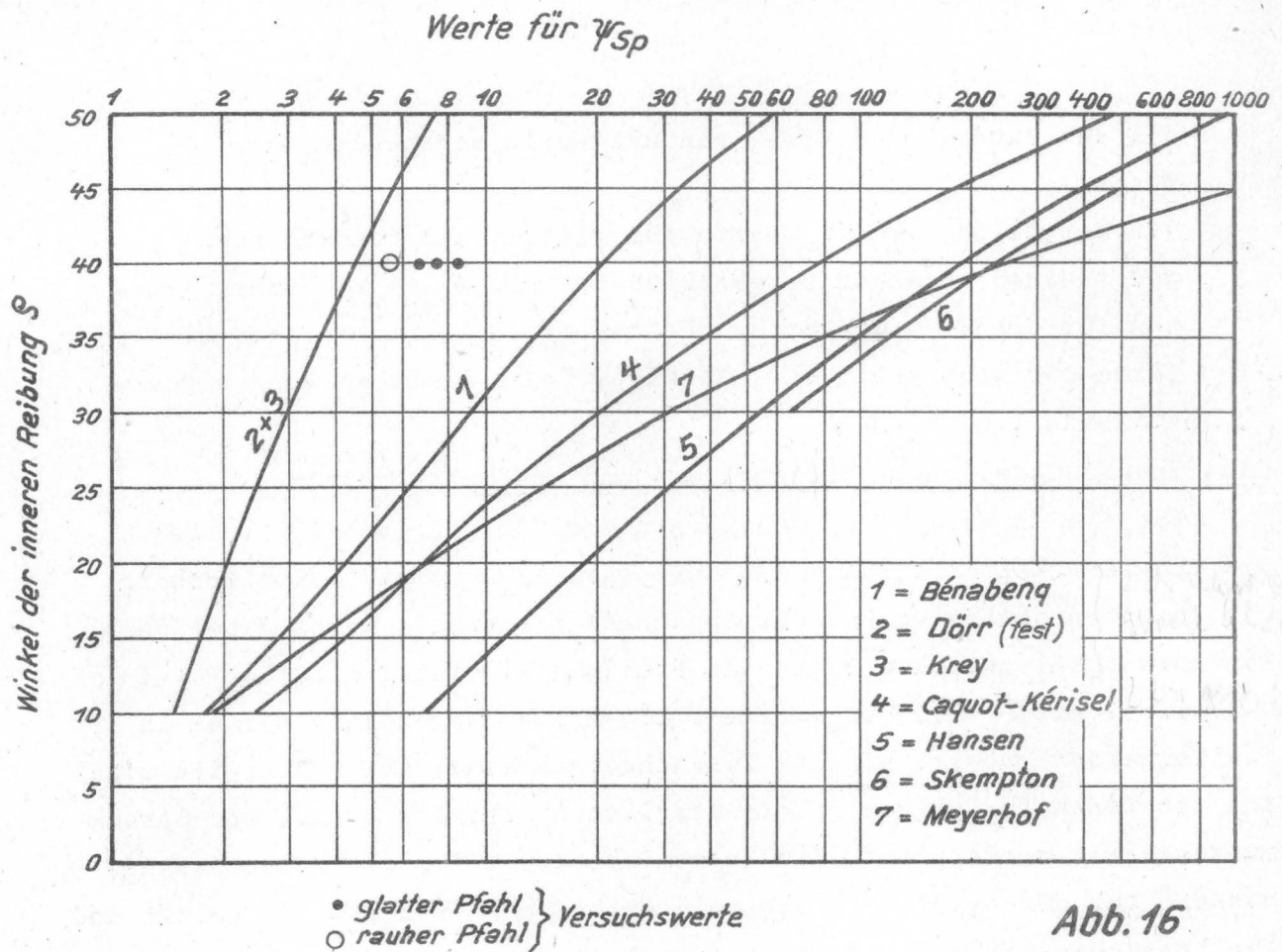
für die untersuchten Pfahllängen von 100, 135 und 170 cm sowie die entsprechenden Mittelwerte für Spitzenwiderstand und Mantelreibung zusammengestellt. Aus der allgemeinen Gleichung (2) für die Tragfähigkeit von Pfählen sind die Werte ψ_{sp} und $\psi_M \cdot \mu'$ errechnet worden. Sie sind in der folgenden Tabelle und auch in Abbildungen 16 und 17 für den ermittelten Winkel der inneren Reibung von $\varphi = 40^\circ$ eingetragen.

Pfahl		Grenztragkraft P (kg) aus Abb. 7	Spitze			Mantel		
Mantelfläche	Länge (cm)		P _{sp} (kg)	P _{sp} /P (%)	ψ_{sp}	P _M (kg)	P _M /P (%)	$\psi_M \mu'$
glatt	100	265	44	16,6	8,6	221	83,4	1,33
glatt	135	360	53	14,7	7,7	307	85,3	1,02
glatt	170	450	58	12,9	6,7	392	87,0	0,82
rauh	100	550	30	5,5	5,8	520	94,5	3,14

Zum Vergleich wurden die ψ_{sp} - und $\psi_M \cdot \mu'$ -Werte auch für die in den Versuchen erreichten Höchstlasten (Abb. 8) ermittelt, die über den hier festgelegten Grenztragfähigkeiten lagen. Die Werte für ψ_{sp} waren für alle drei Pfahllängen konstant, die $\psi_M \cdot \mu'$ -Werte nahmen wie auch in obiger Tabelle mit wachsender Pfahllänge ab.

Aus den so ermittelten ψ_{sp} - und $\psi_M \cdot \mu'$ -Werten und auch aus dem Vergleich mit den Werten aus Abbildungen 16 und 17 ergibt sich folgendes:

- Die absoluten Grössen der ψ_{sp} - und $\psi_M \cdot \mu'$ -Werte liegen für den glatten und rauhen eingegrabenen Pfahl zwischen den von Dörr und Benabenq angegebenen Werten.
- Mit wachsenden Pfahllängen nehmen die ψ_{sp} -Werte für die hier angenommenen Tragfähigkeiten nur wenig ab und bleiben für die Höchstlasten konstant. Die $\psi_M \cdot \mu'$ -Werte nehmen in beiden Fällen mit der Pfahllänge ab. Dies bedeutet, wie schon die nahezu geradlinige Abhängigkeit der Gesamtlast von der Pfahllänge im untersuchten Bereich zeigte (Abb. 7), dass die Mantelreibung nicht



mit dem Quadrat der Höhe, wie allgemein angenommen wird, wächst.

- c) Ein Vergleich der ψ_{sp} -Werte für glatten und rauhen Pfahl zeigt einen geringen Unterschied für die ψ_{sp} - und einen grossen für die ψ_M -Werte, was auf einen beträchtlichen Einfluss der Rauigkeit des Mantels auf die Mantelreibung zurückzuführen ist.

III. Tragfähigkeit aus Spitzenwiderstand und Mantelreibung.

Für die untersuchten Pfahllängen von 100, 135 und 170 cm ist die Tragfähigkeit als Summe aus Spitzenwiderstand und Mantelreibung mit den oben erwähnten Formeln errechnet worden. Es wurde dabei der Reibungswinkel zwischen Boden und Pfahlmantel einmal mit $\delta = \varphi = 40^\circ$ und einmal mit $\delta = 20^\circ$ angenommen. Die ersten Ergebnisse werden in der folgenden Tabelle mit den Versuchsergebnissen für rauhe, die zweiten mit denen für glatte Pfähle verglichen. Bei der Formel von Streck muss bemerkt werden, dass die Ergebnisse nicht für den Versuchssand, sondern für einen "mitteldicht gelagerten Sand" von $\varphi = 33^\circ$ gelten und aus Versuchen mit glatten Stahlplatten gewonnen sind.

Verfahren von	Mantelfläche	Kräfte in kg für Längen								
		100 cm			135 cm			170 cm		
		P_{sp}	P_M	P	P_{sp}	P_M	P	P_{sp}	P_M	P
Bénabeng	rauh	110	640	750	148	1165	1313	187	1850	2037
	glatt		285	395		518	660		824	1011
Dörr	rauh	24	138	162	32	251	283	41	399	440
	glatt		91	115		166	198		262	303
Krey	rauh	24	139	163	32	253	285	41	402	443
	glatt		60	84		110	142		174	215
Caquot-Kérisel	rauh	406	1870	2206	548	3400	3948	690	5400	6090
	glatt		795	1201		1450	1998		2290	2980
Hansen	rauh	988	81	1069	1330	148	1478	1680	235	1915
	glatt		36	1024		64	1394		103	1783
Meyerhof	rauh	1180	-	1180	1590	-	1590	2001	-	2001
	glatt		-	-		-	-		-	-
Skempton	rauh	1280	-	1280	1730	-	1730	2180	-	2180
	glatt		-	-		-	-		-	-
Streck	glatt	87	280	367	116	393	509	145	480	625
Eigene Versuche	rauh	30	520	550	-	-	-	(69)	(831)	(900)
	glatt	44	221	265	53	307	360	58	392	450

Klammerwerte sind durch Extrapolation gefunden.

Hieraus können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Die Feststellung von Skempton und Meyerhof, dass die Mantelreibung vernachlässigt werden kann, wurde durch die Versuche widerlegt. Es ergab sich vielmehr ein verhältnismässig kleiner Anteil für den Spitzenwiderstand, der auch nur wenig zunahm, wenn die hier festgesetzte "Tragfähigkeit" überschritten wurde.

Die absoluten Werte für die Tragfähigkeit von Skempton und Meyerhof liegen sehr viel höher als die der Versuchsergebnisse, auch wenn man bedenkt, dass die Rammpfähle eine grössere Tragfähigkeit als die Bohrpfähle haben. Ein Parallelversuch für einen 100 cm langen, glatten geramten Pfahl ergab eine doppelt so hohe Tragfähigkeit. Dasselbe Ergebnis wurde unter ähnlichen Bedingungen durch Versuche von Müller (Lit. 13) festgestellt.

2. Die absoluten Werte nach Caquot-Kérisel liegen auch unter Berücksichtigung des obengenannten Unterschiedes zwischen Bohr- und Rammpfählen viel höher als die hier beschriebenen Versuchswerte. Auch Lesbordes (Lit. 10) erhielt bei Grossversuchen viel niedrigere Werte als die nach den Formeln von Caquot-Kérisel errechneten.

Der Anteil der Mantelreibung an der Gesamttragfähigkeit wird aber durch die genannte Formel wesentlich besser erfasst als nach den Vorschlägen von Skempton und Meyerhof, wenn auch das Verhältnis von Mantelreibung zu Spitzenwiderstand nicht die Grösse annimmt, wie sie hier in den beschriebenen Versuchen gefunden wurde.

3. Die nach Bénabenq berechneten Werte liegen sehr viel näher an den Versuchswerten als die vorgenannten. Allerdings sind die Spitzendrücke nach Bénabenq grösser als die der hier gefundenen Versuchswerte. Die Mantelreibung, die bei Pfählen von 100 cm eine gute Übereinstimmung erwies, wuchs bei längeren Pfählen stärker an, als es die Versuchsergebnisse zeigten. Danach wächst die Mantelreibung nicht mit dem Quadrat der Pfahllänge, sondern mit einer kleineren Potenz, wie es schon die Betrachtung der $\gamma_M \cdot \mu'$ -Werte ergab.

4. Die Formeln von Krey und Dörr ergeben Werte, die für den Spitzenwiderstand mit dem Versuch verhältnismässig gut übereinstimmen, für die Mantelreibung aber zu kleine Werte ergeben. Da die Mantelreibung nach den Formeln aber mit dem Quadrat wächst, kann bei

grösseren Pfahllängen der berechnete Wert höher als die tatsächlichen liegen.

5. Die Werte von Streck liegen höher als die Versuchswerte, da ja bei der Ableitung der Formel von einem Verdrängungswiderstand ausgegangen worden ist, der bei dem Rammen der Pfähle auftritt. Die Mantelreibung wächst nach den Formeln von Streck nicht mit dem Quadrat der Pfahllänge, sondern ist proportional zu ihr. Diese Tatsache führt zu einer guten Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen, wenn man bedenkt, dass bei der Formel von Streck eine Rammwirkung einerseits und eine lockere Lagerung andererseits berücksichtigt werden müssen.

IV. Betrachtung der Mantelreibungsverteilung.

Die Meßergebnisse über die Mantelreibungsverteilung sind im Kapitel D IV gegeben. Es wurde dort festgestellt, dass bei den glatten, 100, 135 und 170 cm langen Pfählen die Mantelreibung zunächst mit der Tiefe zunahm und nach Erreichung eines Maximalwertes wieder abnahm (Abb. 11 bis 13). Dasselbe wurde beim 170 cm langen rauhen Pfahl beobachtet, während abweichend davon bei dem 100 cm langen rauhen Pfahl die Mantelreibung mit der Tiefe stetig wuchs (Abb. 14).

Aus der gemessenen Mantelreibung kann unter Berücksichtigung des auftretenden Reibungswinkels zwischen Boden und Mantel der auf den Pfahl wirkende Erddruck ermittelt werden. Da der Reibungswinkel jeder entstandenen Verschiebung auf der Pfahllänge als konstant angenommen werden kann, ist die Mantelreibungsfläche proportional der Erddruckverteilungsfläche auf den Mantel.

Die Erklärung der in den Versuchen gefundenen Form der Erddruckverteilung, die von der bei den Berechnungen angenommenen, meistens dreieckförmigen Verteilung abweicht, bleibt einer anderen Arbeit vorbehalten (vgl. auch Lit. 4, 6 und 7). Es wird aber darauf hingewiesen, dass eine Form der Erddruckverteilung mit einem Maximum in der Mitte bei Erddrücken auf unnachgiebige Wände, wie sie auch bei den Pfählen vorliegen, z.B. nach den Versuchen von Grador (Lit. 5) erhalten wurde. Auch die theoretische Betrachtung des Erddruckes auf eine Mantelfläche eines Zylinders von Steinfeld (Lit. 17) unter Voraussetzung einer kegelförmigen Gleitfläche ergab diese hier

gefundene Form. Die bei dem 100 cm langen rauhen Pfahl abweichende Form der Erddruckverteilung wird noch überprüft werden.

G. Schlussfolgerungen.

Die durchgeführten Modellversuche mit eingegrabenen Pfählen in trockenem festgelagerten Sand und ihr Vergleich mit den bekannten Rechenverfahren ergaben:

1. Die Mantelreibung spielt bei der Berechnung der Tragfähigkeit eine wesentliche Rolle.
2. Die Mantelreibung je Flächeneinheit wächst mit der Tiefe bis zu einem Maximalwert und nimmt dann wieder ab.
3. Die Mantelreibung wächst nicht proportional dem Quadrat der Pfahllänge, sondern nach einer anderen Funktion, die noch durch weitere Versuche bestimmt werden muss.

Es sind bei der Behandlung der vorgenannten Probleme noch weitere Fragen aufgetaucht, die einer Klärung bedürfen und die in späteren Arbeiten untersucht werden sollen.

Der Verfasser möchte an dieser Stelle Herrn Dr. Davidenkoff für die Mitarbeit bei der Auswertung der Versuche und Herrn Ing. Sagawe für die praktische Versuchsdurchführung danken.

H. Literaturverzeichnis.

- 1) Bénabeng: Résistance des pieux.
Annales des Ponts et Chaussées 81 (1911) H. 5 u. 6, S. 263 und 91 (1921), H. 4, S. 4.
- 2) Caquot-Kérisel: Traité de mécanique des sols.
Paris: Gauthier-Villars 1949, 385 S.
- 3) Dörr: Die Tragfähigkeit der Pfähle.
Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 1922, 68 S.
- 4) Florentin-L'Hériteau-Farhi: Essais sur modèles réduits de pieux.
TRAVAUX 32 (1948), H. 164, S. 340.
- 5) Grador: Etude expérimentale de la pression exercée par un massif pulvérulent sur un mur de soutènement.
TRAVAUX 32 (1948), H. 164, S. 333.
- 6) Habib: Nouvelles recherches en mécanique du sol.
Ann.I.T.B.T.P.* 4 (1951), H. 224, S. 6.

*) Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics.

- 7) Habib: Essais de charge portante de pieux en modèle réduit.
Ann. I.T.B.T.P.*⁶ (1953), H. 63-64, S. 361.
- 8) Hansen: Simple Statical Computation of Permissible Pile Loads
Christiant & Nielsen-Post (1951), H. 13, S. 14.
- 9) Krey: Erddruck, Erdwiderstand.
Berlin: Ernst & Sohn, 1936, 347 S.
- 10) Lesbordes: Détermination de la force portante de pieux
par des essais sur modèle réduit.
TRAVAUX (1952), H. 207, S. 21.
- 11) Meyerhof: The Ultimate Bearing Capacity of Foundations.
GÉOTECHNIQUE (1951), H. 4, S. 301.
- 12) Meyerhof: Recherches sur la force portante des pieux.
Ann. I.T.B.T.P.*⁶ (1953), H. 63-64, S. 371.
- 13) Müller: Modellversuche über das Zusammenwirken von Mantelreibung,
Spitzenwiderstand und Tragfähigkeit von Pfählen.
Veröff. des Inst. der Deutschen Forschungsgesellschaft
für Bodenmechanik (Degebo) an der Technischen Hochschule
Berlin. (1939), H. 7, S. 10.
- 14) Ohde: Zur Frage der Grenzbelastung von Pfählen.
Strassen- und Tiefbau (1951), H. 11, S. 329.
- 15) Schultze: État actuel des méthodes d'évaluation de la force
portante des pieux en Allemagne.
Ann. I.T.B.T.P.*⁶ (1953), H. 63-64, S. 305.
- 16) Skempton-Yassin-Gibson: Théorie de la force portante des pieux.
Ann. I.T.B.T.P.*⁶ (1953), H. 63-64, S. 285.
- 17) Steinfeld: Über den räumlichen Erdwiderstand.
Mitteilungen der Hannoverschen Versuchsanstalt für
Grundbau und Wasserbau, Franzius-Institut der Techni-
schen Hochschule Hannover. (1953), H. 3, S. 51.
- 18) Streck: Die erdstatische Berechnung der Tragfähigkeit von Pfählen.
Mitteilungen der Hannoverschen Versuchsanstalt für
Grundbau und Wasserbau, Franzius-Institut der Techni-
schen Hochschule Hannover. (1952). H. 1, S. 83.
- 19) Zweck: Mesures sur modèles réduits du frottement latéral et
de la résistance de pointe des pieux.
Ann. I.T.B.T.P.*⁶ (1953), H. 63-64, S. 367.